

CARACTERIZACION DESCRIPTIVA Y ESTADISTICA DE LLUVIAS REGISTRADAS EN ESTACION ROSARIO-AERO EN PERIODO 1986-1998

por

Gerardo Adrián Riccardi

Investigador CIUNR. CURIHAM. FCEIA. UNR

José Hernandez 986. 2000 Rosario (SF). Argentina

TeleFax: 54 (0)341 480 8541 e_mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: Se presentan una serie de resultados obtenidos en el procesamiento y análisis de registros de lluvias tomados en la Estación Rosario-Aero, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional. Este trabajo forma parte de los estudios básicos, previos al desarrollo y puesta en funcionamiento de modelos matemáticos de generación de series de lluvias puntuales. Las tormentas son analizadas bajo diferentes agrupamientos considerando variables del externo de la tormenta como : duración, lámina total e intensidad media; y variables internas como intensidades máximas a distintos intervalos de tiempo, coeficientes de avance y baricéntrico y distribuciones porcentuales de lluvia dentro de la tormenta. La secuencia de las tormentas se analiza mediante el tiempo sin llover entre eventos. Los análisis comprenden el tratamiento individual de cada variable como así también distintas correlaciones entre las mismas. Los resultados permiten caracterizar y describir estadísticamente las lluvias históricas observadas en la estación de referencia, constituyendo una herramienta de importancia para el diseño y seguimiento en operación de obras de saneamiento pluvial.

INTRODUCCION

Los sistemas hidrológicos de llanura producen transformaciones lluvia-caudal que los diferencian marcadamente de los sistemas hidrológicos de las áreas con mayor pendiente. Estas respuestas, más lentas y areales, hacen que sean vulnerables a determinadas señales de entrada que, quizás, no lo sean para los sistemas típicos. Precipitaciones persistentes pueden generar hidrogramas más críticos que lluvias cortas y de gran intensidad (Zimmermann et al., 1996).

Asimismo, en lo que respecta a saneamiento, está claro que las actuaciones ya no sólo deben abarcar cuestiones de cantidad sino de calidad del escurrimiento. A diferencia de los tradicionales abordajes de problemas de protección contra crecidas donde se estudian eventos extremos, asociados a recurrencias de diseño, el impacto de los escurrimientos pluviales sobre cuerpos receptores está relacionado básicamente al primer flujo y/o efectos

acumulativos de una gran cantidad de tormentas de pequeña magnitud (Riccardi, 1998). Estudios realizados en diferentes cuencas urbanas indican que un 85 a 90% de las tormentas que han producido impactos considerables tienen recurrencias menores a 1 año (Laurence et al., 1996). Estos eventos de baja recurrencia no "aparecen" descriptos en las I-D-R. Resulta claro que los estudios hidrológicos e hidráulicos no sólo deben abarcar los eventos extremos, sino que es necesario describir la transformación lluvia-caudal en forma continua temporalmente.

En vistas a contribuir a la resolución de la problemática de la simulación continua de la transformación lluvia-caudal a partir de la década de los 80, comenzaron a desarrollarse modelos estocásticos para la generación continua de lluvias puntuales. Los trabajos Kavvas y Delleur (1981), Rodríguez-Iturbe et al. (1984) y Valdes et al. (1985), entre otros, comenzaron a abordar el modelado temporal de lluvias mediante el uso de teoría de procesos puntuales (Cox y Isham, 1980). Posteriores avances fueron presentados entre otros por Marien y Vandewiele (1986), Rodríguez-Iturbe (1986), Rodríguez-Iturbe et al. (1987a y b), Cowpertwait, (1991 y 1992), Onof y Wheatler (1993), Thauvin et al (1998), Calenda y Napolitano (1999).

Thauvin et al. (1998) clasifica los modelos de lluvias en dos amplios grupos: *los modelos de agregación* y *los modelos de composición*. En el primer caso, cada tormenta es compuesta de un número aleatorio de celdas, y a su vez, cada celda se asocia a un período de lluvia de intensidad y duración aleatorias. La lluvia total se determina mediante la suma de las contribuciones de cada celda. Particular interés han cobrado los denominados modelos de Neyman-Scott (Cowpertwait, 1991) y Barlett-Lewis (Rodríguez-Iturbe et al., 1988) que son capaces de preservar, al menos teóricamente, los parámetros estadísticos muestrales en un amplio rango de las escala de agregación temporal. En el caso de los modelos de composición, la serie de lluvias se considera como una yuxtaposición de entidades tales como períodos secos y períodos lluviosos. Cada período seco es representado por el tiempo entre lluvias y cada período lluvioso se representa por variables como duración, lámina total, intensidades y forma. Estas características son consideradas como variables aleatorias.

El presente trabajo describe el tratamiento estadístico inicial de la información existente en vistas al desarrollo de ambos tipos de modelos y se enmarca en la continuación de diversos abordajes llevados a cabo en la generación sintética de tormentas puntuales en la región de Rosario (Navarro et al., 1996; Riccardi y Zimmermann, 2000; Zimmermann, 1998 y Zimmermann et al., 1996).

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

La información disponible en soporte magnético fue adquirida la Dirección General de Hidráulica y Saneamiento de la Municipalidad de Rosario al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y corresponde a la serie de lluvias desde Enero de 1986 a Junio de 1998 (DGHyS, 1999)

La serie no es completa en los años 1988 y 1989, por lo cual la información de dichos años fue descartada del análisis. Asimismo, si bien el pluviógrafo toma registros cada 5 minutos, solamente en un 36% de las tormentas existe información pluviográfica. En el resto de las tormentas, vale decir en un 74% de la muestra, la información suministrada por el (SMN) es de lámina precipitada durante un cierto lapso de tiempo variable entre 0.5 a 24 horas.

SECUENCIA TEMPORAL DE LLUVIAS Y VARIABLES DEL EXTERNO DE LAS TORMENTAS

Secuencia de períodos secos y lluviosos

La secuencia de eventos secos y lluviosos fue evaluada con el tiempo sin llover entre tormentas ($tsll$), variable esta considerada independiente. Por lo tanto se requiere la separación de la series de precipitaciones históricas en tormentas independientes. Cuando los períodos de lluvias son separados por períodos sin llover demasiado cortos, pueden ser parte del mismo sistema meteorológico y, por lo tanto no ser lluvias independientes. Varios métodos han sido propuestos para identificar el mínimo periodo seco que garantice estadística y físicamente la independencia de los eventos. Restrepo y Eagleson (1982) encontraron que la exponenciabilidad del tiempo sin llover es una condición suficiente para la independencia estadística de la llegada de tormentas. Thauvin et al. (1998) fijaron un umbral de intensidad de 0.20 mm/h, calculado en períodos de una hora. Einfält et al. (1998) un evento de lluvia significativa a aquella en que al menos 5 mm precipitaron en 1 hora, y separaron dos eventos cuando la lluvia durante una hora fue inferior a 0.5 mm. Este último criterio fue adoptado, verificándose además los otros criterios citados.

De la observación de las tormentas regionales queda claro que en un mismo evento meteorológico pueden presentarse más de una lluvia como las definidas con los criterios antes citados. Esto hace cuestionable una hipótesis de independencia física entre todas las lluvias. Sin embargo, resulta de suma importancia la separación de lluvias para la descripción de la alternancia de períodos secos (sin lluvias) y períodos con lluvias continuas. Estos últimos son lo que interesan de mayor manera en el diseño de obras destinadas al saneamiento pluvial.

Un criterio más preciso y complejo para describir el proceso de conformación de tormentas es el que se originara en los años 80 a partir de la teoría de procesos puntuales (ver por ejemplo Cox et al., 1980, Rodríguez Iturbe et al., 1987 y 1988).

Variables del externo de las tormentas

Las características exteriores de cada evento se estudiaron analizando su duración (d) y altura total (p) de precipitación.

Las variables enunciadas fueron estudiadas en agrupamientos mensuales. Los valores medios, desvíos estándares, asimetrías y valores máximos muestrales se presentan en la Tabla 1, en

tanto que en las Figuras 1 a 3 se grafican los valores medios en conjunto con la suma de los valores medios y desvíos estándares, bajo estos últimos se presentan entre un 85-90% de los valores muestrales.

	Tiempo sin llover $tsll$ (hs)					Lluvia p (mm)			
	Valor medio	Desvío estándar	Asimetría	Valor máximo		Valor medio	Desvío estándar	Asimetría	Valor máximo
Ene	71.23	100.33	1.90	524	Ene	12.453	11.778	2.027	69.0
Feb	82.05	104.43	1.52	518	Feb	10.663	14.266	2.445	81.0
Mar	72.34	113.99	2.34	615	Mar	13.550	18.831	4.533	153.0
Abr	73.72	105.26	1.63	453	Abr	11.556	14.700	2.516	83.0
May	105.82	169.43	2.00	518	May	9.584	10.792	2.383	58.8
Jun	136.02	180.85	1.67	788	Jun	7.747	9.638	1.956	37.5
Jul	257.61	307.77	1.13	1027	Jul	6.138	5.925	1.641	22.0
Ago	308.83	409.71	1.36	1306	Ago	6.725	5.534	1.420	23.5
Sep	206.93	294.71	2.45	1495	Sep	5.585	7.214	3.624	40.0
Oct	69.33	125.21	3.61	921.8	Oct	8.563	10.327	3.058	67.0
Nov	63.80	87.60	2.07	473.9	Nov	9.820	14.299	3.577	89.0
Dic	56.57	75.09	2.42	449.7	Dic	10.805	11.642	2.018	60.4

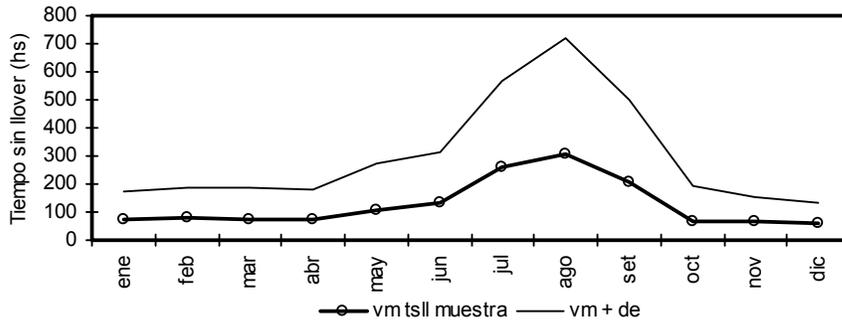
(a)

(b)

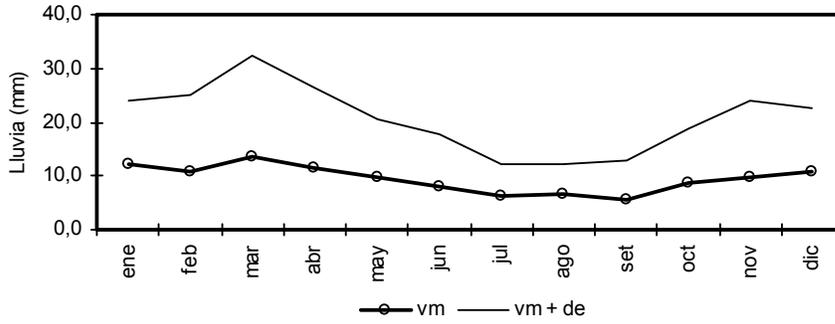
	Duración d (hs)			
	Valor medio	Desvío estándar	Asimetría	Valor máximo
Ene	2.306	1.818	1.768	10.0
Feb	2.497	2.020	1.748	10.9
Mar	2.984	2.087	0.852	10.0
Abr	2.813	1.941	0.939	10.0
May	2.727	1.636	0.500	6.0
Jun	3.624	2.483	0.924	10.0
Jul	3.723	2.294	0.409	8.5
Ago	3.686	1.858	-0.176	6.5
Sep	3.029	1.965	0.365	6.6
Oct	2.416	1.711	0.978	7.1
Nov	2.615	1.532	0.698	6.6
Dic	2.740	1.977	1.227	10.0

(c)

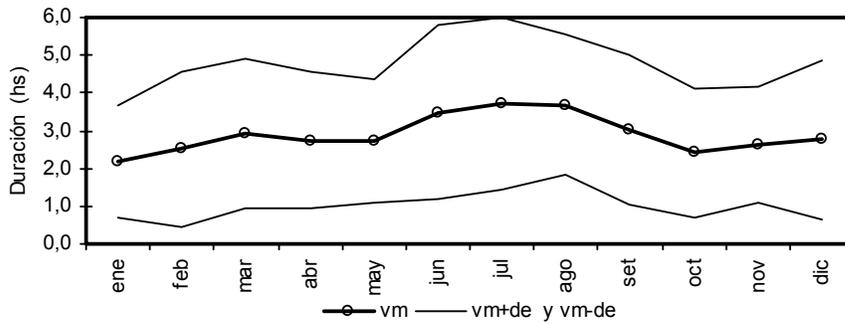
Tabla 1. Variables muestrales en agrupamientos mensuales. (a) Tiempo sin llover; (b) Lluvia y (c) Duración.



(a)



(b)



(c)

Figura 1. Valores medios y desvíos estándares. (a) Tiempo sin llover; (b) Lluvia y (c) Duración

Histogramas de frecuencias

Del análisis de los histogramas de frecuencias relativas de las variables *tsll*, *p* y *d* surge un comportamiento en su mayoría exponencial y en casos acampanado con fuerte asimetría a la izquierda. El modelo estadístico que reprodujo con mayor aproximación la distribución de las tres variables en los 12 meses fue el de Weibull (Chow, 1964). La función de distribución de probabilidad de Weibull puede formularse como:

$$F(x, \alpha, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad [1]$$

donde *x* es el valor de la variable y α y β son los parámetros del modelo. Mediante un proceso de ajuste se determinaron los valores de los parámetros α y β , los que se detallan en la Tabla 2. El ajuste fue llevado a cabo mediante una aproximación con el programa STATGRAPHICS (1989) y un refinamiento manual, maximizando la correlación entre los valores de frecuencia experimental acumulada y de distribución de probabilidad teórica, considerando intervalos de clase de 0.50 hs para la duración, 10 hs para el tiempo sin llover y 3 mm para la lluvia.

	<i>tsll</i>		<i>d</i>		<i>P</i>	
	α	β	α	β	α	β
Ene	0.473466	37.4744	1.37214	2.53623	1.12654	13.0353
Feb	0.528710	49.9830	1.35442	2.74305	0.873636	9.83781
Mar	0.446869	32.9413	1.47062	3.30624	0.911260	12.8688
Abr	0.462940	36.7485	1.49959	3.12444	0.885816	10.7967
May	0.400859	39.3939	1.74242	3.06765	1.035270	9.73985
Jun	0.482979	76.1163	1.48308	4.00504	0.933531	7.46037
Jul	0.473586	145.266	1.70398	4.18154	1.162850	6.51269
Ago	0.418653	145.496	2.14139	4.16135	1.295020	7.30532
Sep	0.466088	110.888	1.55454	3.36650	1.056650	5.73867
Oct	0.425117	28.3833	1.46706	2.67706	1.005030	8.58452
Nov	0.474370	34.7478	1.80399	2.95146	0.906594	9.26481
Dic	0.480094	32.3263	1.44021	3.02668	1.034670	10.9738

Tabla 2. Parámetros ajustados de distribución de probabilidad de Weibull

En el caso de la duración también se la estudió como la composición de intervalos de 0.50 h. La cantidad de intervalos (número entero) de cada lluvia fue ajustada con un modelo de Poisson (Chow, 1964), en el cual la distribución de probabilidad puede formularse como:

$$F(x, \lambda) = \sum_{k=0}^x \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad [2]$$

donde x es el valor entero de la variable *cantidad de intervalos de 0.5 h* y λ es el parámetro de ajuste del modelo. La técnica de ajuste fue similar a la descrita anteriormente y los valores calibrados son los siguientes:

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
λ	4.358	5.023	5.900	5.533	5.492	7.022	7.500	7.321	6.122	5.037	5.198	5.401

Tabla 3. Parámetros ajustados de distribución de probabilidad de Poisson

CANTIDADES DE TORMENTAS Y LLUVIAS MENSUALES Y ANUALES

Si bien la cantidad de tormentas y acumulados de lluvias mensuales y anuales no son variables propias de cada tormenta, conforman una información rigurosamente necesaria para contrastar cualquier metodología o modelo de generación de series de lluvias. Del análisis de las cantidades de tormentas y lluvias acumuladas en cada mes surgen los valores presentados en la Tabla 4 y las Figuras 2 y 3. Resulta útil definir la franja dentro de la cual se encuentran el 85-90% de los valores, por lo cual se grafican junto con el valor medio de cada variable el intervalo (*valor medio - desvío estándar* y *valor medio+desvío estándar*).

	Lluvias acumuladas			Nro. de tormentas		
	Valor medio	Desvío estándar	Valor máximo	Valor medio	Desvío estándar	Valor máximo
Ene	122.26	45.62	195.20	9.82	3.49	16
Feb	83.36	43.70	174.10	7.82	3.66	17
Mar	125.63	75.07	237.60	9.27	5.82	19
Abr	111.35	63.09	195.30	9.64	3.85	15
May	58.37	35.46	129.70	6.09	3.86	13
Jun	31.69	28.43	79.50	4.09	2.51	7
Jul	15.96	17.21	47.70	2.60	2.32	6
Ago	18.83	14.60	46.10	2.80	2.10	7
Sep	22.90	12.37	49.20	4.10	1.97	7
Oct	102.76	36.06	166.50	12.00	4.24	19
Nov	109.00	58.09	199.20	11.10	5.11	23
Dic	130.74	70.85	245.50	12.10	3.21	18

Tabla 4. Nro. de tormentas y Lluvia acumuladas mensualmente

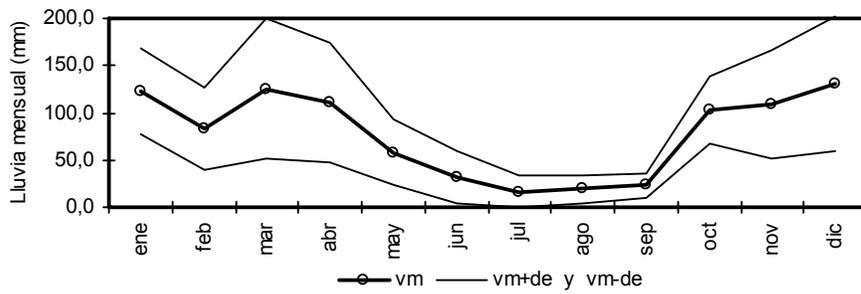


Figura 2. Lluvia acumulada mensualmente

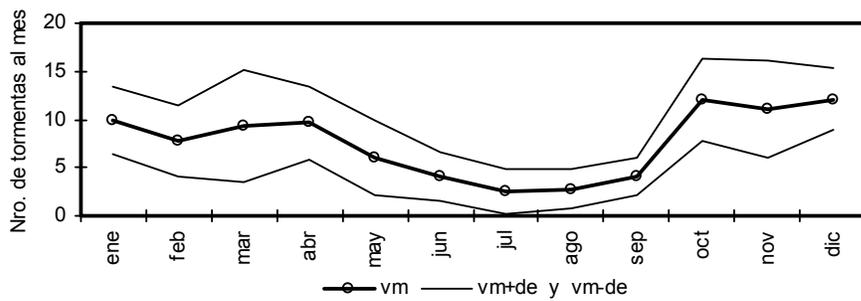


Figura 3. Nro. de tormentas mensuales

En lo que respecta a las cantidades de tormentas al año y las lluvias acumuladas anualmente los valores observados son los siguientes:

	Nro. de tormentas	Lluvia acumuladas
1986	95	891.1
1987	80	807.8
1990	102	1102.1
1991	96	965.7
1992	90	898.7
1993	97	975.6
1994	82	943.5
1995	85	925.8
1996	78	990.7
1997	81	793.7
Media	88.60	929.47
Desvío	8.49	89.97

Tabla 5. Nro. de tormentas y lluvia acumulada anualmente

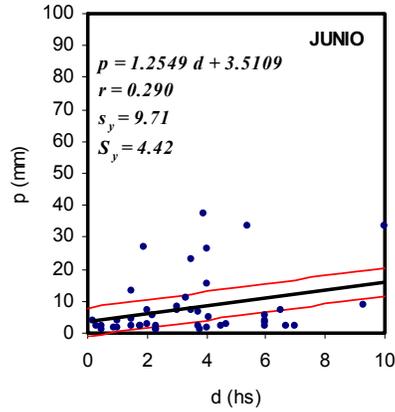
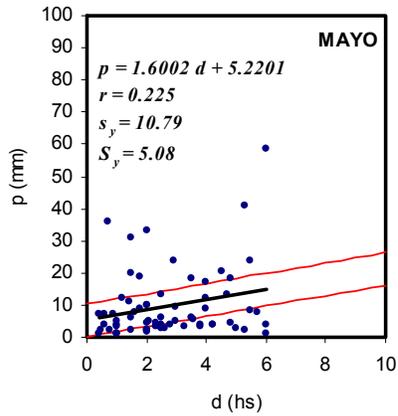
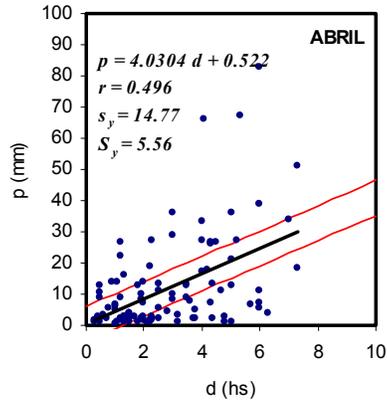
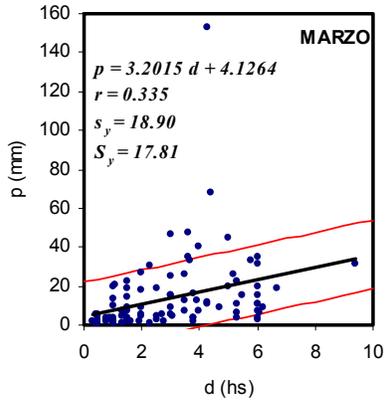
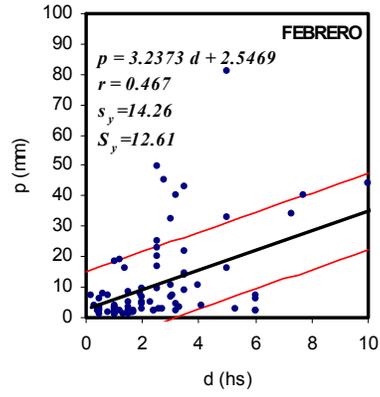
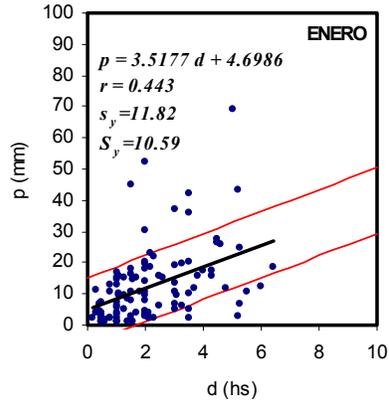
CORRELACION ENTRE DURACIÓN Y LLUVIA

A fin de estudiar la dependencia entre la lluvia y la duración de cada evento, se procedió a analizar las correlaciones lineales entre ambas variables definiendo para cada mes la recta de correlación, el coeficiente de correlación (r) y el desvío estándar de los residuos (S_y) (Chow, 1964). En general las correlaciones no resultaron elevadas, si bien es útil contar con una relación vinculante entre duración y lámina total precipitada, los coeficientes de correlación en el mejor de los casos alcanzaron valores de 0.50 lo que implicó valores muy elevados de los desvíos estándares de los residuos (S_y). Este último valor se define como:

$$S_y = s_y (1 - r^2) \quad [3]$$

Donde r es el coeficiente de correlación entre las variables relacionadas y s_y es el desvío estándar de la variable considerada en el eje y , en este caso la lluvia. En la Figura 4 se grafican las correlaciones obtenidas.

Las correlaciones resultaron más precisas en los meses de primavera y verano, sin embargo quedan fuera de la zona delimitada por el desvío de los residuos los valores extremos, lo que constituye una limitación al uso de estas correlaciones por no poder *ver matemáticamente* eventos extremos.



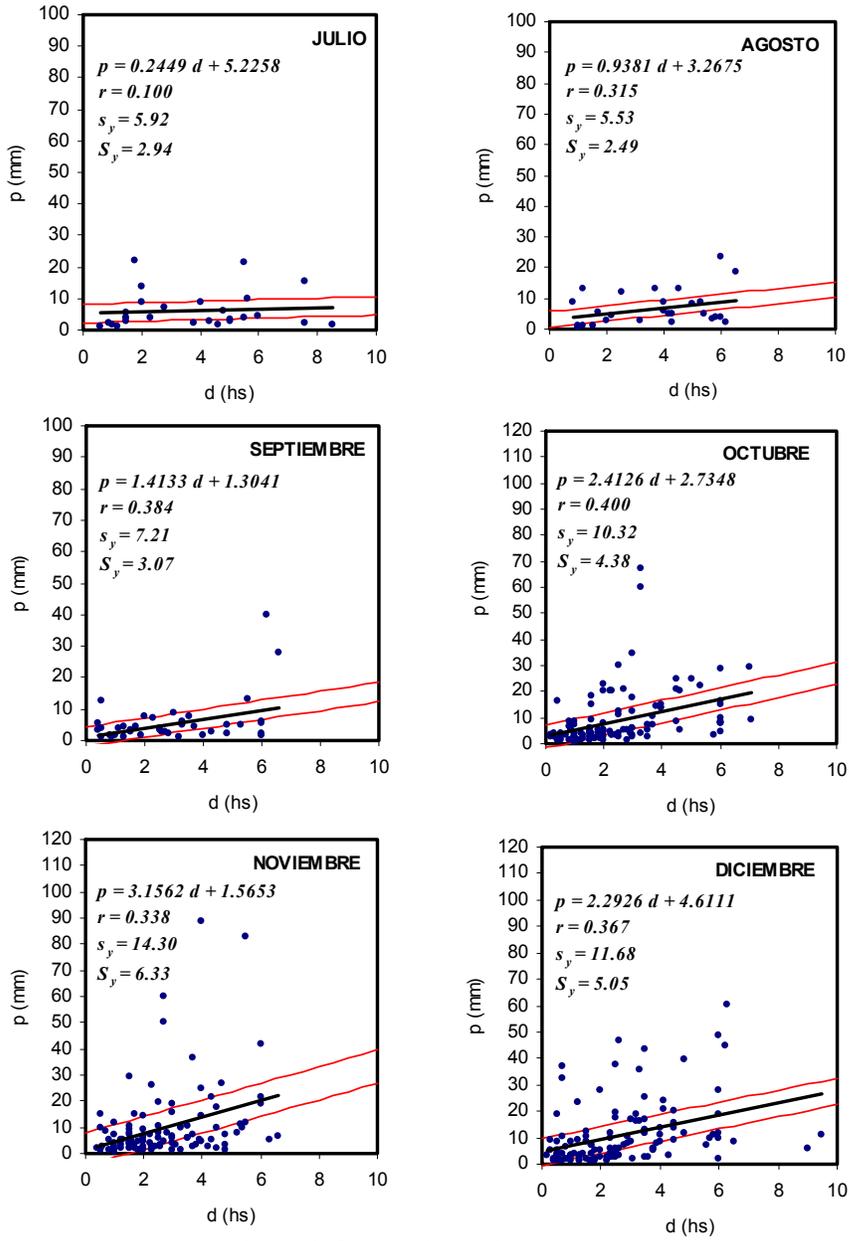


Figura 4. Correlación p-d en cada mes

COEFICIENTES DE AVANCE Y BARICENTRICO

Los coeficiente de avance y baricéntrico son variables internas que describen aspectos de la forma de las tormentas. El coeficiente de avance define la posición del intervalo de mayor intensidad respecto a la duración de la tormenta, por lo que cual dentro del análisis de la distribución interna de las tormentas resulta de importancia su determinación. Esta variable como las tantas otras que se analizan del interno de las tormentas fueron estudiadas en los registros muestrales donde se definió la pluviografía, que como se puntualizara al describir la muestra se trató de un 36% de todas las tormentas registradas.

En forma conjunta con el coeficiente de avance se estudió el coeficiente baricéntrico de cada tormenta, que representa la ubicación del centro de gravedad del hietograma respecto a la duración. Esta variable aporta información respecto al conocimiento de la distribución temporal global de la tormenta.

Ambos coeficientes no mostraron ninguna correlación importante con la duración, la lluvia ni con agrupamientos mensuales. De todos modos se consideró adecuado definir algunos estadísticos en función de la duración, los que se presentan en la siguiente tabla:

	Coeficiente Baricéntrico				Coeficiente de Avance			
	Agregación a 5 minutos		Agregación a 0.50 h		Agregación a 5 minutos		Agregación a 0.50 h	
	Valor Medio	Desvío estándar	Valor medio	Desvío estándar	Valor medio	Desvío estándar	Valor medio	Desvío estándar
M. completa	0.439	0.136	0.4058	0.116	0.363	0.270	0.358	0.227
$d \leq 1$ h	0.436	0.131	0.420	0.109	0.368	0.249	0.383	0.167
$1 \text{ h} < d \leq 2 \text{ h}$	0.432	0.144	0.399	0.116	0.362	0.268	0.357	0.212
$2 \text{ h} < d \leq 4 \text{ h}$	0.436	0.126	0.405	0.105	0.313	0.256	0.339	0.233
$4 \text{ h} \leq d$	0.455	0.145	0.477	0.146	0.439	0.328	0.479	0.267

Tabla 6. Valores muestrales de Coeficiente Baricéntrico y Coeficiente de Avance

Los valores fueron calculados para el máximo nivel de detalle de la muestra, o sea 5 minutos y para 0.50 h. El agregamiento a 0.50 h define valores del coeficiente baricéntrico levemente inferiores (5%) a los calculados con agregamiento de 5 min, excepto para tormentas largas donde se invierte la tendencia. En el caso del coeficiente de avance no existe una tendencia definida y la diferencia es $\pm 4\%$, excepto para tormentas largas donde crecen el valor medio y el desvío. En este tipo de tormentas los valores medios de los coeficientes baricéntrico y de avance se acercan sustancialmente.

En general puede afirmarse que los centro de gravedad de los hietogramas se sitúan temporalmente después del momento de presentación de los intervalos de máxima intensidad.

En lo referente a las tendencias de la frecuencia experimental (agregamiento a 5 min) , el coeficiente baricéntrico ha mostrado un comportamiento claramente gaussiano en tanto que el coeficiente de avance mostró una tendencia levemente decreciente. Una graficación de las tendencias mencionadas se presenta en la siguiente figura:

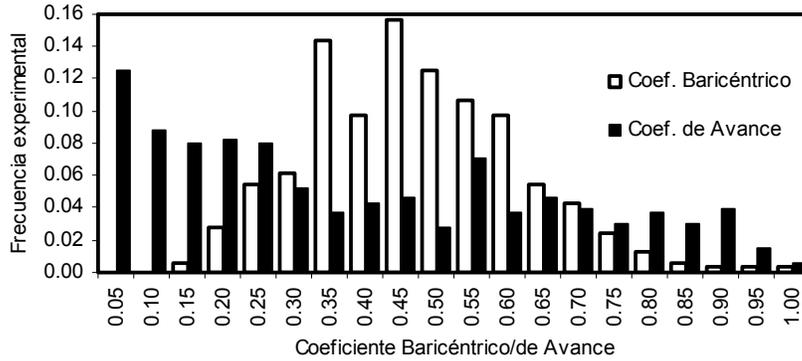


Figura 5. Frecuencia experimental del Coeficiente Baricéntrico y de Avance

Entre ambos coeficientes pudo establecerse una interesante correlación lineal la cual se presenta en la Figura 6 para agregaciones de 5 min y 0.50 h. La correlación con agregación a 0.50 en general mayor a un rango entre 0-10% el valor del coeficiente de avance calculado a partir del baricéntrico.

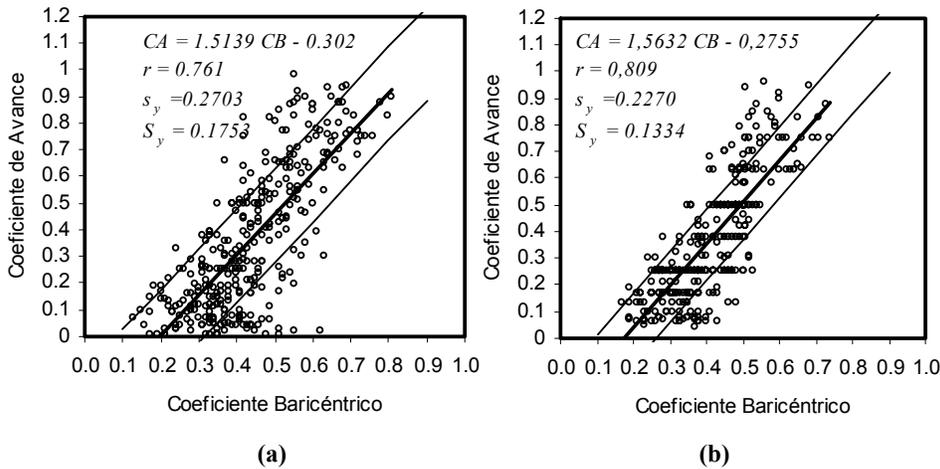


Figura 6. Correlación entre Coeficientes Baricéntrico y de Avance.
 (a) Agregación a 5 min ; (b) Agregación a 0.50 h

INTENSIDADES MEDIAS

Si bien la intensidad media resulta de la relación entre la lluvia total y la duración de la tormenta, es de interés en algunos casos abordarla como una variable independiente. Como la intensidad media no depende de la pluviografía, el análisis se realizó en la muestra completa con un agrupamiento mensual.

La intensidad media mostró un comportamiento estadístico fuertemente exponencial (con intervalos de clase de 2 mm/h), por lo que pudo ser ajustada de una manera precisa por el modelo de Weibull. En la Tabla 7 se presentan para cada mes los estadísticos muestrales más relevantes, el valor máximo y los coeficientes de Weibull resultantes del ajuste. En la Figura 7 se grafican los valores medios y desvíos conjuntamente con el cociente entre los valores medios de la lluvia p y la duración d .

	Intensidad media <i>imed</i> (mm/h)					
	Valor medio	Desvío estándar	Asimetría	Valor máximo	Parámetros de Weibull	
					α	β
Ene	6.828	6.053	2.119	36.7	1.230	7.341
Feb	4.920	5.656	2.560	35.0	1.008	4.940
Mar	5.079	5.354	2.589	35.6	1.089	5.269
Abr	4.814	5.169	1.970	26.0	1.006	4.827
May	4.853	7.218	4.519	51.4	0.919	4.621
Jun	3.104	3.926	2.618	20.0	0.921	2.970
Jul	2.233	2.538	2.806	12.2	1.056	2.289
Ago	2.314	2.631	2.545	10.8	1.089	2.405
Sep	2.870	4.826	3.804	24.6	0.919	2.731
Oct	4.352	5.097	3.723	40.3	1.074	4.498
Nov	4.147	5.167	2.779	30.0	0.990	4.126
Dic	5.567	8.000	3.777	52.6	0.941	5.377

Tabla 7. Intensidad media en agrupamientos mensuales

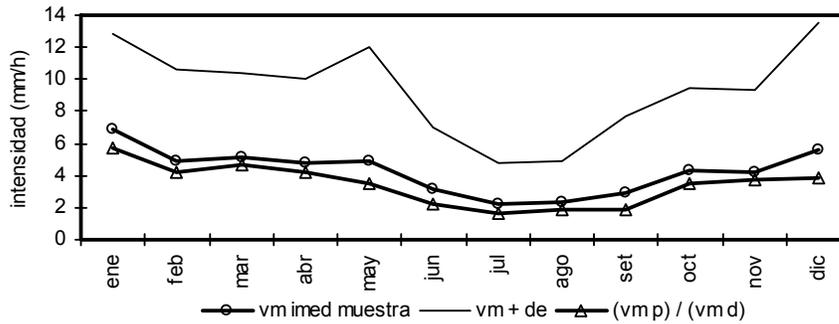


Figura 7. Intensidad media en agrupamientos mensuales

Se observa que la intensidad media calculada a partir del cociente entre los valores medios de lluvia y duración son inferiores a los que resultan de considerar la intensidad media como una variable independiente. Por otro lado si se hubiera considerado inicialmente la intensidad media y la duración, calculando la lluvia mediante el producto de $imed \times d$ se calcularían láminas superiores a las que resultaron de considerar el tratamiento directamente de la variable p . Estos comportamientos indican que cuando se aborde un determinado problema en la temática, deberán considerarse originalmente las variables cuyos parámetros estadísticos se desean preservar. El no contemplar estos comportamientos puede conducir a sub o sobreestimar unas u otras variables.

En la búsqueda de posibles correlaciones se contrastó la intensidad media con la duración. Si bien la tendencia es *a mayor duración menor intensidad media*, existe una dispersión de valores que hace ciertamente complejo el vincular ambas variables sin excluir los valores extremos. El grado de correlación obtenida y desvíos de errores fueron más pobres que en el caso de la relación entre duración y lluvia total.

INTENSIDADES MAXIMAS

Las intensidades máximas fueron estudiadas en la muestra reducida. En un primer análisis se estudiaron los comportamientos estadísticos de las intensidades en períodos de 5 min a 300 min. Los histogramas de frecuencias indicaron en todos los casos comportamientos preponderantemente exponenciales. El valor medio, el desvío estándar, el coeficiente de asimetría y el valor máximo de las intensidades para cada intervalo de tiempo se presenta en la Tabla 8.

En la Figura 8 se grafican el valor medio de la intensidad máxima, el valor medio + desvío estandar (curva bajo la cual se encuentran aproximadamente el 85% de los puntos) y el valor máximo, en función del intervalo de tiempo de selección de la intensidad máxima.

Importante observación respecto a valores máximos de intensidades máximas

Respecto a los valores máximos de las intensidades máximas debe destacarse que los valores observados en pluviógrafos de la región demuestran que los valores registrados en la estación Rosario Aero no incluyen la pluviografía de tormentas donde se produjeron valores máximos de intensidades máximas. Concretamente, a partir de datos registrados en pluviógrafos rurales ubicados en el Despacho Nacional de Cargas (DNC) (zona rural de Perez) y en Ibarlucea, durante el corto período 1994-1996, pudieron determinarse valores extremos de intensidades máximas superiores a los de Rosario Aero, a pesar de lo corto de las series de registros.

En las tormentas de los días 17/03/94, 21/02/95 y 12/03/96 en los pluviógrafos del DNC e Ibarlucea se registraron valores extremos en tanto que en Rosario Aero no se registró pluviografía. Este déficit de la información, al menos en la serie 1986-1998, plantea una

importante incertidumbre sobre la representatividad de las intensidades máximas extremas registradas en la estación en estudio. Asimismo si esta incertidumbre no es debidamente cuantificada puede generar errores en cualquier herramienta estadística que se aplique a intensidades extremas.

En la Figura 9 se presentan los valores máximos de las intensidades máximas de las tres estaciones y claramente se puede observar la diferencia entre los registros. Debe quedar claro que es ciertamente complejo demostrar la subvaloración de la curva de Rosario Aero puesto que *lo que no se ha medido no se conoce*. Lo que resulta rigurosamente cierto es que en aquellos eventos en que en la región se han presentado intensidades máximas extremas en Rosario Aero no se ha podido medir en detalle, por lo cual de acuerdo con la tendencia regional es probable que en Rosario Aero también se hubieran producido también extremos de intensidades y, por lo tanto, es probable de que la curva originada en las intensidades registradas subvalores los máximos.

En	Intensidad Máxima (mm/h)				En	Intensidad Máxima (mm/h)			
	Valor medio	Desvío estándar.	Asimetría	Valor máximo		Valor medio	Desvío estándar.	Asimetría	Valor máximo
5 min	28.147	27.612	1.479	152.4	125 min	6.866	5.190	1.617	27.5
10 min	21.094	19.849	1.516	106.8	130 min	6.736	5.119	1.664	27.2
15 min	17.651	17.207	1.800	99.6	135 min	6.676	5.029	1.644	26.9
20 min	15.467	15.080	1.800	86.7	140 min	6.570	4.916	1.668	26.8
25 min	13.711	13.306	1.814	76.3	145 min	6.436	4.786	1.692	26.5
30 min	12.577	12.045	1.732	67.8	150 min	6.317	4.764	1.693	26.3
35 min	11.711	11.212	1.726	61.7	155 min	6.185	4.738	1.731	26.1
40 min	10.763	10.264	1.732	56.7	160 min	5.945	4.583	1.882	25.9
45 min	10.198	9.590	1.718	53.2	165 min	5.872	4.521	1.966	25.8
50 min	9.671	9.069	1.759	49.8	170 min	5.882	4.474	1.980	25.6
55 min	9.204	8.543	1.776	46.3	175 min	5.859	4.460	1.943	25.4
60 min	8.892	8.205	1.837	47.4	180 min	5.778	4.414	1.963	25.1
65 min	8.873	7.977	1.789	46.7	210 min	5.223	3.945	1.971	22.43
70 min	8.764	7.677	1.737	44.1	240 min	4.766	3.595	1.931	20.18
75 min	8.564	7.370	1.700	41.4	270 min	4.326	3.222	1.896	18.04
80 min	8.309	7.037	1.685	39.0	300 min	3.962	2.936	1.8995	16.5
85 min	8.134	6.704	1.664	36.8					
90 min	7.894	6.265	1.597	34.8					
95 min	7.669	6.013	1.598	33.0					
100 min	7.431	5.772	1.614	31.3					
105 min	7.315	5.658	1.604	29.8					
110 min	7.147	5.511	1.601	28.6					
115 min	7.099	5.399	1.557	28.0					
120 min	6.955	5.315	1.597	27.8					

Tabla 8. Estadísticos de las intensidades máximas en distintos intervalos de tiempo

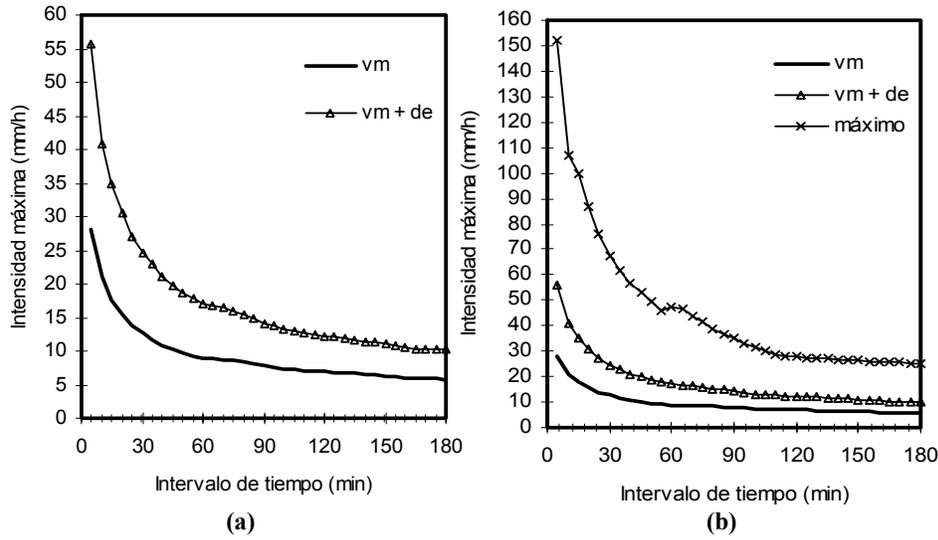


Figura 8. Intensidad máxima en función del intervalo de tiempo. (a) Valor medio (vm) y valor medio+desvío estandar (vm + de) ; (b) vm, vm + de y valor máximo

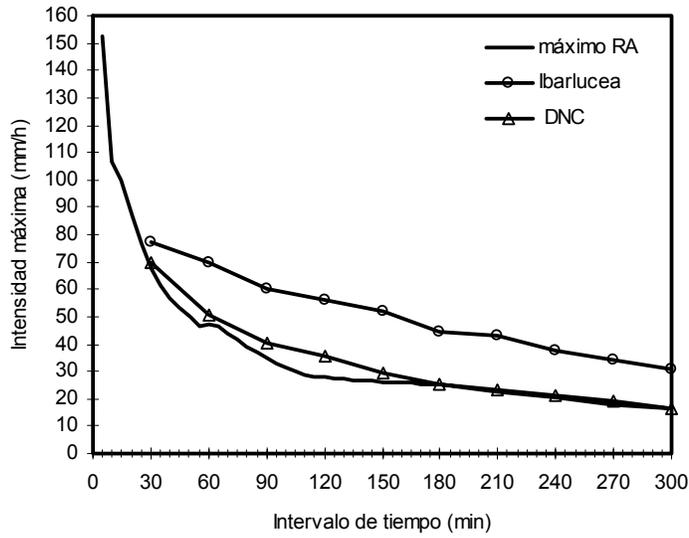


Figura 9. Valores máximos de intensidades máximas en Estaciones Rosario Aero, Ibarlucea y DNC

RELACION INTENSIDADES MEDIAS Y MAXIMAS

En lo que concierne a las relaciones entre intensidades medias y máximas en 5 minutos se analizaron las correlaciones lineales en dos tipos de agrupamientos. El primero correspondió a un ordenamiento por lluvia p , donde se separaron las tormentas en grupos de $p \leq 5 \text{ mm}$; $5 \text{ mm} < p \leq 10$; $10 \text{ mm} < p \leq 15 \text{ mm}$; $15 \text{ mm} < p \leq 20 \text{ mm}$ y $p > 20 \text{ mm}$. Expresando la relación entre intensidades como: $I_{\text{max en 5 min}} = a I_{\text{med}} + b$, los parámetros de la ecuación lineal a y b y el coeficiente de correlación obtenidos son:

Rango de p (mm)	a	b	r
$p \leq 5$	1.7147	3.5693	0.785
$5 < p \leq 10$	2.0741	10.071	0.765
$10 < p \leq 20$	1.5137	28.549	0.555
$p > 20$	2.8269	37.066	0.563

Tabla 10. Correlación entre Intensidades medias y máximas en 5 minutos agrupadas por lluvias

En el rango $p \leq 10 \text{ mm}$ la correlación es medianamente importante, siendo para lluvias superiores bastante pobre.

El segundo ordenamiento analizado correspondió a un agrupamiento por duración. Los intervalos considerados fueron $d \leq 1 \text{ h}$; $1 \text{ h} < d \leq 2 \text{ h}$; $2 \text{ h} < d \leq 4 \text{ h}$ y $d > 4 \text{ h}$. Se utilizaron ecuaciones lineales forzando su paso por 0, con lo cual sin perder precisión se lograron relaciones más simples. Los coeficientes determinados indican una importante correlación de las variables bajo este ordenamiento. Los resultados se presentan en la tabla siguiente:

Rango de d (h)	a	r
$d \leq 1$	2.2872	0.849
$1 < d \leq 2$	4.5050	0.881
$2 < d \leq 4$	5.8640	0.764
$d > 4$	8.8205	0.857

Tabla 11. Correlación entre Intensidades medias y máximas en 5 minutos agrupadas por duraciones

Dado que se encontraron mejores correlaciones entre intensidades medias y máximas (en 5 min) con agrupamientos por duraciones, se procedió al análisis de las correlaciones para distintos intervalos de determinación de las intensidades máximas. A tal efecto se

determinaron las ecuaciones lineales vinculantes (forzadas a pasar por 0) para un rango del intervalo de tiempo de determinación desde 5 a 180 minutos (Tabla 11 y Figura 10).

Imax/Imed en 10 min	Rango de $d(h)$	a	r	Imax/Imed en 20 min	Rango de $d(h)$	a	r
	$d \leq 1$	1.8548	0.906		$d \leq 1$	1.6278	0.956
	$1 < d \leq 2$	3.4380	0.930		$1 < d \leq 2$	2.6029	0.944
	$2 < d \leq 4$	4.5717	0.805		$2 < d \leq 4$	3.4612	0.863
	$d > 4$	6.1288	0.851		$d > 4$	4.5590	0.878
Imax/Imed en 30 min	Rango de $d(h)$	a	r	Imax/Imed en 40 min	Rango de $d(h)$	a	r
	$d \leq 1$	1.3475	0.982		$d \leq 1$	1.2079	0.994
	$1 < d \leq 2$	2.087	0.962		$1 < d \leq 2$	1.8016	0.970
	$2 < d \leq 4$	2.8862	0.881		$2 < d \leq 4$	2.4533	0.892
	$d > 4$	3.6056	0.888		$d > 4$	3.0265	0.902
Imax/Imed en 50 min	Rango de $d(h)$	a	r	Imax/Imed en 60 min	Rango de $d(h)$	a	r
	$d \leq 1$	1.1183	0.998		$1 < d \leq 2$	1.3891	0.983
	$1 < d \leq 2$	1.5742	0.977		$2 < d \leq 4$	1.8813	0.916
	$2 < d \leq 4$	2.1213	0.900		$d > 4$	2.5649	0.928
	$d > 4$	2.7137	0.919				
Imax/Imed en 75 min	Rango de $d(h)$	a	r	Imax/Imed en 90 min	Rango de $d(h)$	a	r
	$1.25 < d \leq 2$	1.2099	0.988		$1.50 < d \leq 2$	1.1464	0.994
	$2 < d \leq 4$	1.6245	0.931		$2 < d \leq 4$	1.4267	0.941
	$d > 4$	2.3556	0.933		$d > 4$	2.1039	0.940
Imax/Imed en 105 min	Rango de $d(h)$	a	r	Imax/Imed en 120 min	Rango de $d(h)$	a	r
	$1.75 < d \leq 2$	1.0849	0.999		$2 < d \leq 4$	1.2322	0.969
	$2 < d \leq 4$	1.3017	0.952		$d > 4$	1.7637	0.941
	$d > 4$	1.9267	0.941				
Imax/Imed en 135 min	Rango de $d(h)$	a	r	Imax/Imed en 150 min	Rango de $d(h)$	a	r
	$d \leq 4$	1.1949	0.981		$d \leq 4$	1.1808	0.985
	$d > 4$	1.6303	0.937		$d > 4$	1.5550	0.935
Imax/Imed en 165 min	Rango de $d(h)$	a	r	Imax/Imed en 180 min	Rango de $d(h)$	a	r
	$d \leq 4$	1.1445	0.990		$d \leq 4$	1.0973	0.994
	$d > 4$	1.4872	0.954		$d > 4$	1.4229	0.957

Tabla 11. Relaciones lineales entre Intensidades máximas y medias

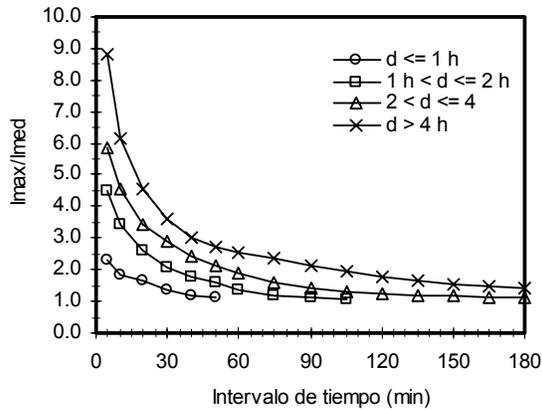


Figura 10. Relación de intensidades máximas y medias en función del intervalo de tiempo y para un agrupamiento de tormentas por duraciones

DISTRIBUCIÓN INTERNA DE LA LLUVIA EN LAS TORMENTAS

Con el fin de determinar parámetros que permitan describir la distribución interna de la lluvia en las tormentas se procedió a analizar los acumulados precipitados en intervalos de ½ hora. Los análisis se realizaron con tres ordenamientos diferentes. Los primeros dos ordenamientos correspondieron a acumulados de lluvia para tormentas clasificadas por duración y por lluvia total. El tercer ordenamiento correspondió a parciales de lluvia por intervalos de ½ hora con las tormentas agrupadas por duración.

Acumulados de lluvia clasificados por duración

En el 1er. ordenamiento se clasificaron las tormentas en duraciones de $d \leq 1 h$; $1 h < d \leq 2 h$; $2 h < d \leq 4 h$ y $d > 4 h$ y se determinaron cada 5 min los respectivos porcentajes de lluvia caída acumulada respecto al total caído. Los valores calculados son valores medios de toda la serie. En la Figura 11 se presentan las curvas correspondientes a la totalidad de las tormentas clasificadas por duración conjuntamente con una curva correspondiente a todas las tormentas.

Entre los datos relevantes de este análisis pudo establecerse por ejemplo, que para la 1er. media hora, considerando todas las tormentas cae un 34% de la lluvia total. Si se las discrimina por duraciones, en las tormentas con $d \leq 1 h$ cae un 83%; en las lluvias con $1 h < d \leq 2 h$ un 43%; en las lluvias con $2 h < d \leq 4 h$ un 28% y en las de mayor duración un 15.6%. Para la 1er. hora de lluvia cae un 53.4% considerando todas las tormentas, obviamente corresponde un 100% de las tormentas con $d \leq 1 h$; cae un 77% de

las lluvias con $1 h < d \leq 2 h$; un 48% en las lluvias con $2 h < d \leq 4 h$ y en las de mayor duración un 25%. Este tipo de información resulta de utilidad para la definición de las pérdidas de escurrimiento y la determinación de los hietogramas netos.

Debe destacarse que los valores determinados corresponden a la serie reducida (36% de las tormentas). Si a esta serie reducida le agregamos los totales de las tormentas sin pluviografía pero con duraciones iguales a las coordenadas temporales (0.50 h, 1.00 h, 1.50 h, 2.00 h, etc.) la curva correspondiente a todas las tormentas se incrementa en un 10-15% incrementando la cantidad de tormentas incluidas en el análisis hasta el 72% para $t = 4.0$ h.

Acumulados de lluvia clasificados por lluvia total de la tormenta

En este ordenamiento se clasificaron las tormentas en $p \leq 10 mm$; $10 mm < p \leq 20 mm$ y $p > 20 mm$. En la Figura 13 se presentan las respectivas curvas porcentuales determinadas. Realizando el mismo análisis planteado en la anterior clasificación pudo determinarse que en la 1er. media hora cae un 46% de lluvias con $p \leq 10 mm$, el 36% de lluvias con $10 mm < p \leq 20 mm$ y el 26% de lluvias con $p > 20 mm$. En la 1er. hora de lluvia cae el 67% de lluvias con $p \leq 10 mm$, el 56% de lluvias con $10 mm < p \leq 20 mm$ y el 45% de lluvias con $p > 20 mm$.

Parciales de lluvia acumulados en $\frac{1}{2}$ hora

En este caso se agruparon las tormentas por sus duraciones y dentro de cada duración se determinaron los valores medios, desvíos estándares y valores máximos de los porcentuales de lluvia caída dentro de cada intervalo de $\frac{1}{2}$ hora. Se consideraron duraciones hasta de 6 h, abarcando mas del 95.2% de las tormentas (en la serie reducida). En lo referente a los histogramas de frecuencias de cada conjunto de valores donde se extrajeron los valores medios, desvíos y máximos, no se advirtió una tendencia definida de tales histogramas. Los comportamientos estadísticos se repartieron entre exponenciales crecientes y decrecientes y campanas simétricas y asimétricas. En la Tabla 12 y Figura 14 se exponen los valores determinados. Debido a la relativamente poca cantidad de tormentas en cada clasificación por duración no fue posible realizar en cada caso una subclasificación por cantidad de lluvia.

Sin perder de vista la limitación antes mencionada, los parámetros obtenidos con este agrupamientos permiten describir la forma de por lo menos un 95% de las tormentas registradas con pluviografía. Asimismo, al no tratarse de la muestra completa siguen valiendo para estos parámetros los cuestionamientos sobre representatividad planteados al abordar las intensidades máximas.

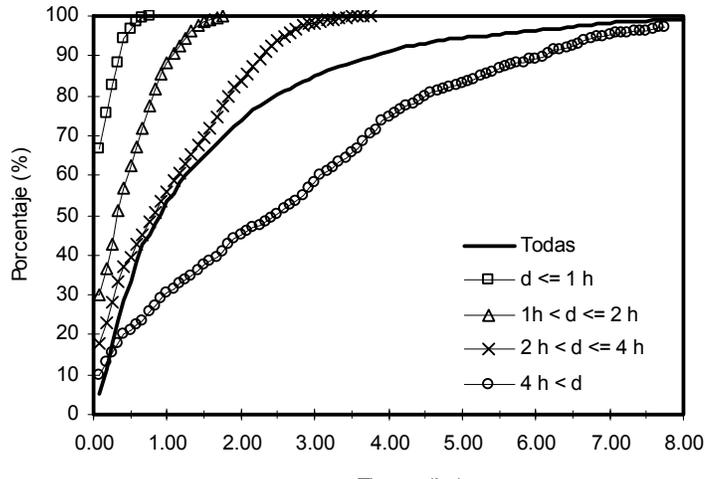


Figura 11. Porcentaje de lluvia acumulada en función del tiempo para tormentas clasificadas por duración

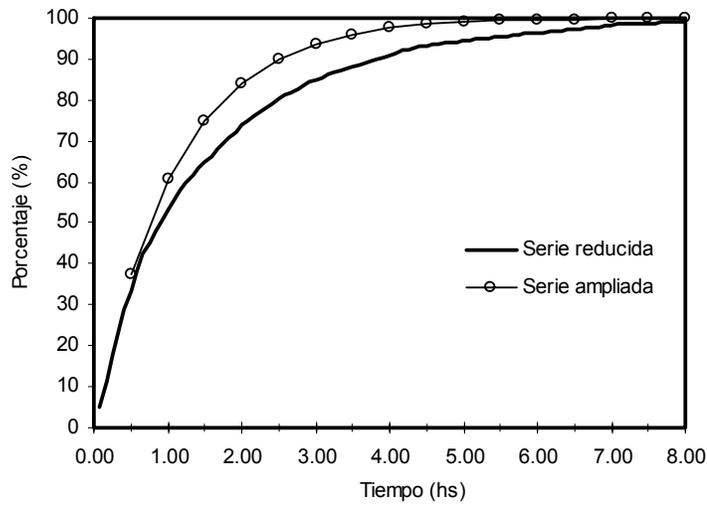


Figura 12. Variación de acumulados en función del tiempo al ampliar la muestra

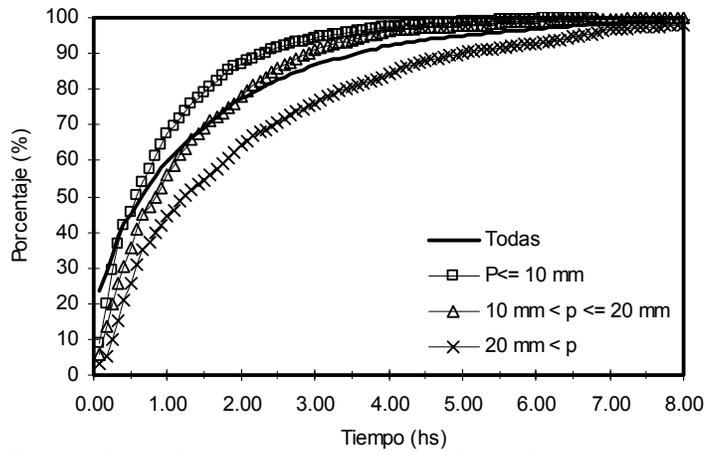


Figura 13. Porcentaje de lluvia acumulada en función del tiempo para tormentas clasificadas por lluvia total

	0 h- 0.5 h %	0.5 h- 1.0 h %	1.0 h- 1.5 h %	1.5 h- 2.0 h %	2.0 h- 2.5 h %	2.5 h- 3.0 h %	3.0 h- 3.5 h %	3.5 h- 4.0 h %	4.0 h- 4.5 h %	4.5 h- 5.0 h %	5.0 h- 5.5 h %	5.5 h- 6.0 h %
d = 1.0 h												
VM	74.3	25.7										
DE	22.8	22.8										
Max	99.0	98.0										
d = 1.5 h												
VM	47.6	38.7	13.7									
DE	24.4	22.6	14.8									
Max	88.2	92.8	68.0									
d = 2.0 h												
VM	30.6	32.6	26.8	10.0								
DE	23.5	20.8	16.9	13.1								
Max	90.6	80.7	62.1	71.5								
d = 2.5 h												
VM	27.5	22.5	22.9	19.2	7.9							
DE	18.0	12.5	19.1	12.4	8.1							
Max	68.0	47.5	72.7	57.9	34.5							
d = 3.0 h												
VM	22.1	20.8	17.7	18.0	15.5	5.9						
DE	18.7	13.8	13.0	12.9	11.5	6.9						
Max	77.4	58.0	61.9	58.2	64.4	31.3						

Tabla 12. (continúa)
continuación)

	0 h- 0.5 h %	0.5 h- 1.0 h %	1.0 h- 1.5 h %	1.5 h- 2.0 h %	2.0 h- 2.5 h %	2.5 h- 3.0 h %	3.0 h- 3.5 h %	3.5 h- 4.0 h %	4.0 h- 4.5 h %	4.5 h- 5.0 h %	5.0 h- 5.5 h %	5.5 h- 6.0 h %
<i>d = 3.5 h</i>												
VM	21.2	19.8	17.4	10.5	14.5	13.1	3.5					
DE	18.3	16.6	13.7	8.6	11.7	11.2	3.6					
Max	68.0	61.9	57.5	32.1	49.8	42.5	12.2					
<i>d = 4.0 h</i>												
VM	21.4	13.4	14.2	15.3	11.4	11.8	8.9	3.4				
DE	15.9	10.9	9.8	8.6	4.9	7.9	6.3	2.5				
Max	54.3	46.0	34.4	37.8	22.4	26.7	25.4	9.8				
<i>d = 4.5 h</i>												
VM	28.3	10.5	10.4	9.6	10.8	12.5	8.9	5.7	3.3			
DE	20.4	6.0	8.6	5.1	8.4	8.8	6.3	3.5	5.3			
Max	61.8	20.0	28.7	19.0	29.1	28.5	19.5	12.2	16.3			
<i>d = 5.0 h</i>												
VM	10.1	7.5	8.0	7.8	6.4	4.1	19.4	13.3	16.2	7.2		
DE	15.6	4.8	5.2	7.5	6.2	2.8	18.3	9.8	7.5	11.6		
Max	44.5	15.9	14.6	20.9	17.1	7.5	55.4	33.8	22.8	32.8		
<i>d = 5.5 h</i>												
VM	7.8	12.1	9.4	11.9	15.4	16.7	6.7	13.3	4.3	2.0	0.4	
DE	5.3	9.3	5.5	9.7	4.9	7.1	6.9	10.5	3.3	0.4	0.2	
Max	12.1	18.0	7.4	21.4	18.8	13.4	3.9	2.7	0.6	1.6	0.1	
<i>d = 6.0 h</i>												
VM	1.4	2.2	6.1	7.2	7.0	11.1	10.7	18.7	7.8	8.8	10.5	8.5
DE	1.0	2.6	4.5	4.8	4.2	8.6	5.9	13.2	7.3	5.1	5.4	5.8
Max	2.8	6.6	13.6	15.6	11.7	24.6	17.9	35.2	16.8	14.1	15.3	15.1

Tabla 12. Porcentajes de parciales de lluvia acumulados en intervalos de ½ hora

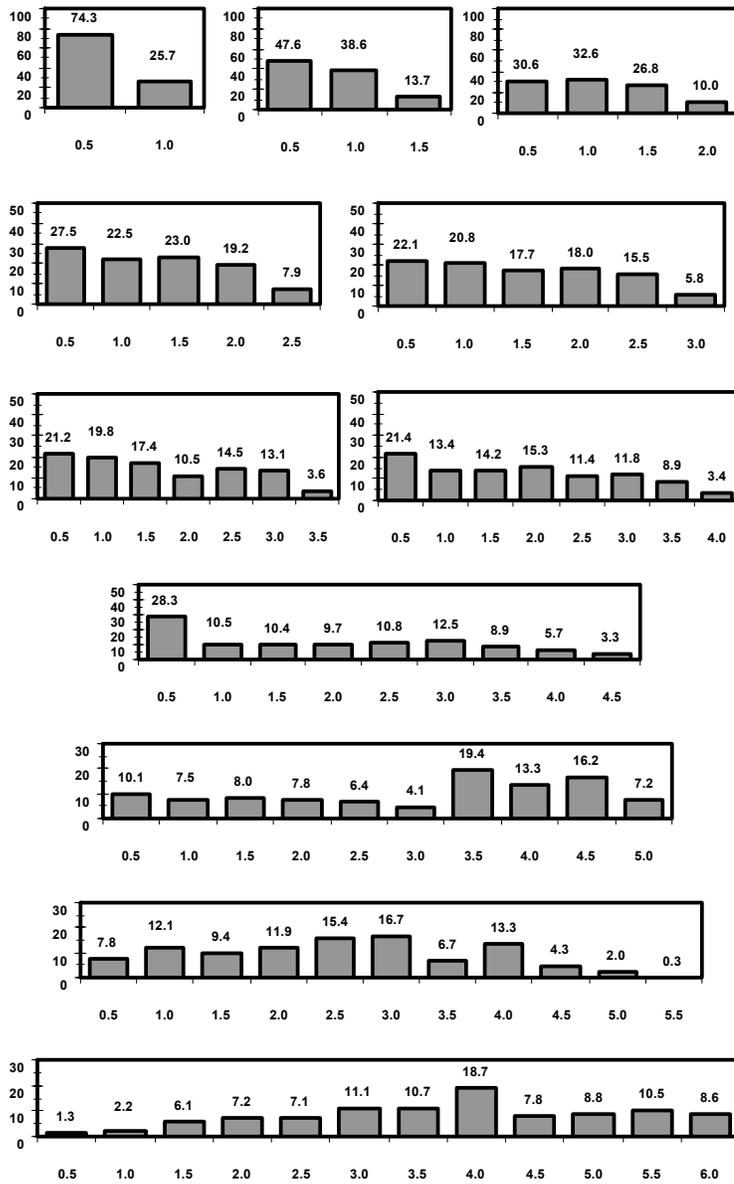


Figura 14. Valores medios de porcentajes de parciales de lluvia acumulados en intervalos de ½ hora. Tormentas de duración desde 1.0 h hasta 6.0 h.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un abordaje matemático y estadístico que permite caracterizar y describir la serie de lluvias registradas en el período 1986-1998 en la estación Rosario Aero.

Se analizaron variables que describen la secuencia entre lluvias, el externo y el interno de la tormenta tales como tiempo sin llover entre tormentas, duración, lámina total, intensidad media, intensidades máximas para distintos intervalos de tiempo, coeficiente de avance y baricéntrico y distribución interna de la lluvia, y otras variables complementarias como cantidad de tormentas y acumulados de lluvia mensuales y anuales.

Fueron analizadas correlaciones y se definieron en los casos pertinentes las ecuaciones vinculantes. En cada variable del externo e interno de las tormentas como así también de la secuencia de períodos secos-húmedos se estudiaron los histogramas de frecuencias definiendo las tendencias y los modelos matemáticos de mejor ajuste.

Las variables del externo y la secuencia de tormentas fueron ordenadas en agrupamientos mensuales, en tanto que las correspondientes al interno se clasificaron en casos por duración y/o por cantidad de lluvia.

La intensidad medias fue estudiada como variables dependiente (lámina/duración) y como independiente. Además su vinculación con las intensidades máximas fue determinada en agrupamientos por lámina y por duraciones para un amplio rango del intervalo de tiempo.

El análisis de las intensidades máximas puso en evidencia la incertidumbre generada en la reducida medición de registros pluviográficos respecto al total de lluvias de la serie. De la comparación con pluviografías regionales surge la fuerte hipótesis que no se han registrado los máximos valores de intensidades máximas, al menos durante el período en estudio.

Por último se entiende que los resultados obtenidos constituyen una amplia y variada herramienta para la construcción de tormentas o series de tormentas con afinidad estadística a las registradas en Rosario Aero, elementos éstos de relevante importancia para el diseño y seguimiento en operación de obras de saneamiento pluvial.

Agradecimientos:

A la Dirección General de Hidráulica y Saneamiento de la Municipalidad de Rosario que cedió sin cargo la información de registros de lluvias utilizada en este trabajo.

Al Ing. Raul Postiglione por la colaboración en la definición de relaciones matemáticas y estadísticas entre las distintas variables involucradas con utilidad para proyectistas de obras de saneamiento pluvial.

BIBLIOGRAFIA

- Calenda, G. and Napolitano, F. (1999), Parameter estimation of Neyman-Scott processes for temporal point rainfall simulation, *Journal of Hydrology*, Vol. 225, pp. 45-66.
- Cowpewart, P.S.P.,(1991), Further Developments of the Neyman-Scott clustered point process for modelong rainfall, *Water Resources Research*, Vol. 27 (7), pp. 1431-1438.

- Cowpertwait, P.S.P., (1992), Correction to Further Developments of the Neyman-Scott clustered point process for modeling rainfall, *Water Resources Research*, Vol. 28 (5), p. 1497.
- Cox, D.R. and Isham, V. (1980), *Point Processes*, Chapman and Hall, London.
- Chow, V.T. (1964), *Handbook of Applied Hydrology*, Mc Graw-Hill, New York
- DGHyS (1999), Dirección General de Hidráulica y Saneamiento de la Municipalidad de Rosario, *Serie temporal de lluvia 1986-1998*, en soporte magnético, Rosario.
- Einfalt, T., Johann, G. and Pfister, A. (1998), On the Spatial Validity of Heavy Point Rainfall Measurements, *Water. Sciences Technology*, IAWQ, Vol. 37, N° 11, Elsevier Science Ltd., pp. 21-28.
- Kavvas, M.L., Delleur, J.W., (1981), A stochastic model of daily rainfall sequences, *Water Resources Research*, Vol. 17 (4), 1151-1160.
- Laurence, A., Marsalek, J., Ellis, J. and Urbonas, B., (1996), Stormwater detention & BMPs, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, pp. 799-814.
- Marien, J.L. and Vandewiele, G.L., (1986), A Point Rainfall Generator with Internal Storm Structure, *Water Resources Research*, Vol. 22 (4), pp. 475-482.
- Navarro, R., Zimmermann, E. y Silber, M. (1996), Análisis de Tormentas para la Generación de Series Sintéticas, *Cuadernos del Curiham*, CURIHAM-UNESCO-PHI, Vol. 2, N° 1, ISSN 1514-2906, Rosario, Argentina, pp. 62-69.
- Onof, C. and Wheatler, H.S., (1993), Modelling of British rainfall using a random parameter Barlet-Lewis rectangular pulse model, *Journal of Hydrology*, Vol. 149, pp. 67-95.
- Restrepo, P.J. and Eagleson, P.S. (1982), Identification of Independent Rainstorms, *Journal of Hydrology*, Vol. 44, pp 303-319.
- Riccardi, G. (1998), La calidad del escurrimiento pluvial urbano y el impacto sobre los cuerpos receptores, *Cuadernos del Curiham*, CURIHAM-UNESCO-PHI, Vol. 4, N° 1, ISSN 1514-2906, Rosario, Argentina, pp. 31-46.
- Riccardi, G. y Zimmermann E. (2000), Modelo Probabilístico de Tormentas Puntuales Aplicado a Rosario Aero (Santa Fe, Argentina), *Uso y Preservación de los Recursos Hídricos en los Umbrales del Siglo XXI*, (Farias H. et. al, editores), Santiago del Estero, Argentina, pp. 57-58.
- Rodriguez-Iturbe, I., (1986), Scale of fluctuations of rainfall models, *Water Resources Research*, Vol. 22 (9), pp. 15S-37S.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gupta, V.K. and Waymire, E., (1984), Scale considerations in the modelling of temporal rainfall, *Water Resources Research*, Vol. 20 (11), pp. 1611-1619.
- Rodriguez-Iturbe, I. and Eagleson, P.S. (1987a), Mathematical models of rainstorm events in space and time, *Water Resources Research*, Vol. 23 (1), pp. 181-190.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R. and Isham, V. (1987b), Some models for rainfall based on stochastic point processes, *Proc. R. Soc. Lond.*, Series A (410), pp. 269-288.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R. and Isham, V. (1988), A Point Process for Rainfall: further developments, *Proc. R. Soc. Lond.*, Series A (417), pp. 283-298.
- STATGRAPHICS (1989), Statistical Graphics System Versión 4, STSC, Inc. and Statistical Graphical Corporation, USA.
- Thauvin E., Gaume E. And Roux C., (1998), A Short Time-Step Point Rainfall Stochastic Model, *Water Sciences and Technology*, IAWQ, Vol. 37, N° 11, Elsevier Science Ltd., pp. 37-45.
- Valdes, J.B., Rodriguez-Iturbe, I. and Gupta, V.J., (1985), Approximations of temporal rainfall model from a multidimensional model, *Water Resources Research*, Vol. 21 (8), pp. 1259-1270.
- Zimmermann E, Navarro R. y Silber M., (1996), "Un Modelo Probabilístico para la Generación de Tormentas Sintéticas", *XVII Cong. Latinoamericano de Hidráulica, IAHR-LAD*, Guayaquil, Ecuador.
- Zimmermann E., (1998), "Synthetic Storm Generation in a Flatland Region, Santa Fe, Argentina", *Journal of Environmental Hydrology* (IAEH), Vol. 6, N° 2, pp. 1-5.